

Alexi Sivonen

MAHDOLLISUUKSIA KIVIHIILEN KORVAAMISEKSI TEOLLISUUDEN MONIPOLTTOAINEKATTILASSA

Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Aleksi Sivonen: Mahdollisuuksia kivihiilen korvaamiseksi teollisuuden monipolttoainekattilassa (Possibilities for coal replacement for industrial multi-fuel boiler)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Energia- ja prosessiteknikka

Kesäkuu 2019

Tässä kandidaatintyössä, joka tehtiin Stora Enso Oyj:n Varkauden tehtaiden voimalaitokselle, oli pääasiallisena tarkoituksena tutkia kolmea valittua polttoainetta ja niiden soveltuvuutta voimalaitoskattilan polttoaineeksi kivihiilen tilalle. Tämän lisäksi tehtävänä oli ottaa selvää kuinka hyvin nykyiset kivihiilen syöttämiseen ja varastointiin tarkoitetut laitteet soveltuvat mainituille polttoaineille ja kartoittaa tarvittaessa mahdollisia vaihtoehtoja nykyisten laitteiden tilalle.

Tarkasteltaviksi polttoaineiksi valittiin puupelletti, torrefioitu pelletti sekä palaturve. Mainittuja polttoaineita tutkittiin kirjallisuudesta sekä selvitettiin tarvittavat lähtötiedot polttoaineen syöttölaitteiden arviointia varten. Kattilan polttoainetehon tarpeen mukaan laskettiin tarvittavat polttoainevirrat ja pohdittiin miltä osin ne olivat toteutettavissa nykyisillä laitteistoilla. Kävi ilmi, että ne eivät soveltuneet täysin uusille polttoaineille, joten mahdollisia korvaavia ratkaisuja tiedusteltiin laitostoimittajilta.

Lopputulena todettiin, että nykytilanteessa puupelletti voisi olla paras lähtökohta, mikäli pohditaan kivihiilen korvaamista biopolttoaineella. Lisäksi löydettiin sopiva syöttölaiteratkaisu, joka soveltuu tarvittaessa kaikille käsitellyille polttoaineille. Laitoksen nykyisiä laitteista siilot ovat todennäköisesti hyödynnettävissä myös uusien purkulaitteiden kanssa, mikäli niihin tehdään tarvittavat käyttöturvallisuuteen liittyvät muutokset. Tulevaisuudessa, mikäli torrefioitun pelletin saatavuus paranee, puupelletti voitaisiin vaihtaa siihen, jolloin päästään lähemmäs kivihiilen lämpöarvoa ja energiatiheyttä.

Avainsanat: puupelletti, kivihiili, palaturve

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|---------------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Laitos ja syöttölaitteet | 3 |
| 2.1 | Stora Enson Varkauden tehtaait | 3 |
| 2.2 | Voimalaitokset | 3 |
| 2.3 | Kattila 6 | 4 |
| 2.4 | Hiilen syöttölaitteisto | 5 |
| 3 | Biopolttoaineet | 7 |
| 3.1 | Kivihiili | 7 |
| 3.2 | Puupelletti | 8 |
| 3.3 | Torrefioitu pelletti | 9 |
| 3.4 | Palaturve | 11 |
| 4 | Vaadittavat muutokset | 14 |
| 4.1 | Tarvittavat polttoaineen massavirrat | 14 |
| 4.2 | Kuljettimet | 15 |
| 4.3 | Kuljettimien kapasiteetti | 17 |
| 5 | Yhteenveto ja johtopäätökset | 19 |
| Lähdeluettelo | | 21 |

1 JOHDANTO

Kivihiili on toiminut yhteiskunnan yhtenä tärkeimmistä energianlähteistä jo satoja vuosia. Se on edullista ja sitä on helposti saatavilla. Loistavien ominaisuuksiensa vastapainona on kuitenkin polttoaineen uusiutumattomuus sekä merkittävät hiilidioksidipäästöt, jotka fossiilisyyden takia tuottavat hiilidioksidin nettolisäystä ilmakehään. Nykyisellään on yleisesti vahva pyrkimys vähentää kivihiilen poltosta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä, joten sen käyttö suurissa määrin energiantuotannossa on asetettu kyseenalaiseksi. Suomessaakin on käyty paljon keskustelua kivihiilestä ja hallitus on tehnyt päätöksen sen polttoainekäytön kieltämisestä vuoteen 2029 mennessä. (Valtioneuvosto 2018) Muun muassa Helsingissä pohditaan ratkaisua kivihiilen korvaamiseksi kaukolämmön tuotannossa. Kiristyvät ympäristövaatimukset asettavat myös teollisuudelle painetta luopua fossiilisista polttoaineista. Metsäteollisuus on Suomessa käyttänyt ja myös tuottanut vuosikymmeniä paljon uusiutuvaa bioenergiaa esimerkiksi mustalipeää polttamalla. Kuitenkin fossiiliset polttoaineet, kuten kivihiili ja raskas polttoöljy, ovat pysyneet tiukasti uusiutuvien rinnalla. (Tilastokeskus 2017)

Fossiilisia polttoaineita on Suomen energiantuotannossa pyritty korvaamaan erilaisilla metsäpohjaisilla biomassoilla sekä turpeella. Erilaisia biomassoja on Suomessa hyvin saatavilla, mutta ne ovat polttoteknisiltä ominaisuuksiltaan heikompia kuin esimerkiksi kivihiili. Tästä johtuen biomassaa on pyritty jalostamaan paremmaksi polttoaineeksi esimerkiksi lämmön avulla käsittelemällä tai tiivistämällä sitä pelleteiksi. (Bergman 2005) Tässä työssä tutkitaan käsittelemättömästä sekä torrefioidusta biomassasta valmistettuja pellettejä sekä palaturvetta, joka on myös eräänlainen turpeesta valmistettu pelletti. Mainitut polttoaineet soveltuvat hyvin kintettä polttoainetta käyttävään leijupetikattilaan.

Työn tarkoituksena on ottaa kirjallisuuden avulla selvää yllä mainituista polttoaineista, joita olisi mahdollista käyttää kivihiilen tilalla energiantuotannossa. Lisäksi pohditaan millaisilla polttoaineensyöttöjärjestelmillä kyseiset polttoaineet saataisiin käyttöön Stora Enso Varhauksen tehtailta ja onko muutosprosessissa mahdollista hyödyntää voimalaitoksen nykyisiä hiilensyöttölaitteita. Työn ensimmäisessä luvussa tutustutaan yleisellä tasolla Varhauksen tehtaisiin sekä alueelta löytyviin voimalaitoksiin sekä tarkastellaan kuinka paljon kulutetusta energiasta tuotetaan kivihiilen avulla. Toisessa luvussa tutkitaan potentiaalisia polttoaineita, joilla kivihiili voitaisiin korvata. Otetaan selvää millaisia ominaisuuksia polttoainella on ja pohditaan niiden käyttöä ja turvallisuuteen liittyviä näkökulmia. Käsitelyosiossa selvitetään millaisia vaatimuksia uudet polttoaineet asettavat voimalaitoksen syöttölaitteille ja varastoinnille. Työn viimeisessä luvussa käsitellään mahdollisia ratkaisui-

ja polttoaineiden käyttöönottamiseksi. Lisäksi käydään läpi vaihtoehtoja syöttölaitteille ja tutkitaan miltä osin nykyiset laitteistot olisivat hyödynnettävissä. Lopuksi yhteenvedossa tarkastellaan tuloksia ja pohditaan potentiaalisia kehitysmahdollisuuksia.

2 LAITOS JA SYÖTTÖLAITTEET

Tarkastelun kohteena työssä on Stora Enso Oyj:n omistama tuotantolaitos Pohjois-Savossa Varkauden kaupungissa. Tässä luvussa esitellään tehdas yleisellä tasolla, sekä kohteena oleva voimalaitos hieman tarkemmin. Lisäksi käydään lyhyesti läpi nykyistä polttoainejakaumaa ja energiantuotantomääriä.

2.1 Stora Enson Varkauden tehtaet

Tehtaan päätuotteena ovat pakkausteollisuuden käyttöön tarkoitetut liner-kartongit. Linereita käytetään aaltopahvin valmistuksessa pahvin pintakerroksen materiaalina. Liner-kartonki on tyypillisesti kaksikerroksinen kartonki, jonka pintakerros on lajista riippuen joko valkaistu tai valkaisematon. Valkaistulla pintakerroksella valmistettuja linereita kutsutaan white-top-linereiksi ja valkaisemattomalla pintakerroksella valmistettuja kraft-linereiksi. White-top-linereita käytetään esimerkiksi kuvallisten pakkausten raaka-aineena. Kartongin kerrokset voivat olla kokonaan neitseellistä sellua tai sisältää tietyn määrän kierrätyskuitua. Varkaudessa kartonkia tuotetaan yhdellä kartonkikoneella 390 000 tonnia vuodessa. Pakkauskartonkitehtaan yhteydessä toimii integroitu sellutehdas, joka tuottaa kartonkikoneelle valkaisematonta korkeakappaista sellua. Tehtaan tuotanto käytetään lähes kokonaan kartongin valmistukseen, mutta vuosituotannosta pieni osa myydään myös markkinaselluna. Neitseellisen kuidun lisäksi pakkauskartonkitehtaalla hyödynnetään myös kierrätyskuitua, joka tuotetaan tehdasalueella sijaitsevalla uusiokuitulaitoksella esimerkiksi kierrätetystä aaltopahvista.

Varkaudessa sijaitsee myös Stora Enson saha sekä viilupuuta (laminated veneer lumber) valmistava tuotantolinja, joka avattiin suljetun paperitehtaan tiloihin vuonna 2015. Tehdasalueella harjoitetaan pääasiassa kemiallista ja mekaanista metsäteollisuutta, mutta alueella toimii myös kaksi kalankasvattamoa, jotka hyödyntävät tehtaan hukkalämpöä. (Stora Enso 2018) Näin ollen tehdasalueella on monia erilaisia energiankuluttajia.

2.2 Voimalaitokset

Tehtaan alueella toimii kolme kattilalaitosta, jotka tuottavat energiaa tuotantolaitosten käyttöön. Lämpövoimalaitokset (LVL) 1 ja 2 sekä soodakattilalaitos. Lämpövoimalaitos 1 on viimeisimpänä uudistettu ja myöskin kapasiteetiltaan pienin voimalaitos. Se pitää si-

sällään kiertopetikaasuttimen sekä tuotekaasukattilan. Kaasutin käyttää polttoaineenaan alumiinipitoista muovirejektiä. Alumiini erotetaan prosessissa ja tuotekaasu poltetaan kattilassa. Laitoksella sijaitsee myös tehtaan toinen aktiivikäytössä oleva vastapaineturbiini. Lämpövoimalaitos 2 on lämpöteholtaan suurin tehtaan voimalaitoksista. Laitokseen kuuluu Kattila 6 sekä toinen käytössä oleva vastapaineturbiini. Kattila 6 on kiertoleijukattila ja sillä poltetaan enimmäkseen puunkäsittelyssä syntyvää kuorta. Tuotantolaitokset käyttivät vuonna 2018 noin 1 617 GW h lämpöenergiaa. Kokonaislämmöntuotannosta 58% tuotettiin soodakattilalaitoksella polttamalla sellutehtaan prosessissa syntyvää mustalipeää. LVL2:lla tuotettiin 38% ja loput 4% LVL1:llä. Soodakattila on osa sellutehtaan talteenotto-linjaa, joten sillä tuotettava teho määräytyy kuitulinjalta tulevan mustalipeän polttotarpeen mukaan. Sellutehtaan tuotanto on lähtökohtaisesti käynnissä ympäri vuoden, joten se selittää myös soodakattilan suuren osuuden kokonaislämmöntuotannosta. Voimalaitokset voivat tarvittaessa tuottaa energiaa myös Varkauden kaupungin kaukolämpöverkostoon tehtaan höyryverkkoon liitetyn kaukolämpöaseman kautta. (Stora Enso 2018)

Energiantuotannossa käytettävistä polttoaineista 89% on erilaisia biopolttoaineita, kuten kuorta ja mustalipeää. Kattila 6:n polttoaineesta 7% koostuu erinäisistä kierrätykseen kelpaamattomista muovijakeista, kuten nestepakkauskartonkien pinnoitteista. Raskasta polttoöljyä sekä kivihiiltä polttoainejakaumasta on 4%. Kivihiilellä tuotettiin noin 41 GW h. Fossiiliset polttoaineet eivät ole pääasiallisia energianlähteitä, vaan niitä käytetään tarvittaessa. Tyypillinen raskaan polttoöljyn kuluttaja sellutehtailla on talteenottolinjan meesauuni, jonka avulla talteenotto-prosessissa syntyvää kalsiumkarbonaattia regeroidaan poltetuksi kalkiksi uudelleenkäyttämistä varten. Varkauden tehtaan meesauunin polttoaineena käytetään kuitenkin pääasiassa tuotekaasua, jota saadaan kaasuttamalla alueella syntyviä mekaanisen metsäteollisuuden sivuvirtoja, kuten sahanpurua, kieropetikaasuttimessa. Tuotekaasun käyttö meesauunilla poistaa kokonaan tarpeen käyttää raskasta polttoöljyä normaalin tuotannon aikana. (Stora Enso 2018)

2.3 Kattila 6

Kattila 6 on Varkauden tehtaiden suurin voimalaitoskattilla ja se tuottaa ainoana kattilana höyryä 110 baarin painetasolla. Kattila on rakenteeltaan luonnonkiertoinen kahdella syklonilla varustettu kiertopetikattila. Se on A. Ahlström Osakeyhtiön valmistama ja otettu käyttöön vuonna 1989. Kiertopetitekniikan ansiosta kattilassa pystytään käyttämään monia polttoaineita sekaisin, eli se on monipolttoainekattila. Pääasiallisena polttoaineena käytetään puunkäsittelyssä syntyvää kuorta sekä muuta metsäbiomassaa. Poltettavasta kuoresta osa tulee omalta kuorimolta, mutta kuorta tulee myös ulkopuolelta. Lisäksi laitoksella on mahdollisuus käyttää polttoaineena kivihiiltä, joko yksin tai biomassan rinnalla. Kivihiilellä on mahdollisuus tuottaa koko kattilan tarvitsema polttoainetehto, mikäli biomassaa ei ole käytettävissä tai sen syötössä on vakavia häiriöitä.

Kattila on lämpöteholtaan 150 MW ja sen korkein höyrystys on 60 kg s^{-1} . Näin korkealla kuormituksella tarvitaan biopolttoaineen lisäksi kivihiiltä tukipolttoaineeksi johtuen

biopolttoaineen matalasta lämpöarvosta ja kuljetinten maksimikapasiteetista. Biopolttoaineen, joka koostuu enimmäkseen kuoresta, sekaan lisätään tarvittaessa muovirejektia, jonka ansiosta polttoaineen lämpöarvoa saadaan nostettua. Tämä osaltaan pienentää kivihiihen tarvetta. Laitoksella poltetaan myös tehtaan jätevedenpuhdistamolla syntyvää lietepuristetta, joka siirretään puhalluslinjaa pitkin voimalaitokselle ja lisätään biomassan sekaan.

Laitoksella on erilliset polttoaineensyöttölaitteistot ja siilot kuorelle sekä kivihiihelle, joten mikäli kuorilinjalla syntyy syöttöhäiriöitä, kattilan automaatio ottaa hiilen tueksi, jotta tarvittava teho saavutetaan. Kuoren syöttölaitteistoon kuuluu kaksi 200 m³ kokoista kuorisiiloa, joissa on molemmissa identtiset purkulaitteistot. Siiloista polttoainetta puretaan hydraulisten tankopurkainten avulla syöttöruuveille, jotka purkavat polttoaineen kahdelle kolakuljettimelle. Polttoainevirtauksen mittausta suoritetaan syöttöruuveilla sijaitsevilla radiometrisillä vaa'oilla. Näille kolakuljettimille yhdistyy myös hiililinjalta tuleva polttoaine. Molempien kolakuljettimien polttoainevirta jaetaan kahden sulkusyöttimen kesken, joten yhteensä niitä on neljä. Sulkusyöttimet pudottavat polttoaineen kattilan polviin, eli syklooneilta tullutta petimateriaalia tulipesään palauttaviin yhteisiin. Polttoaineen syöttö on alunperin mitoitettu siten, että pelkkää kuorta käyttämällä voidaan saavuttaa 41 kg s⁻¹ höyrystys. Kuitenkin käyttämällä sekapolttoainetta, joka sisältää kuoren lisäksi myös muovirejektia, voidaan saavuttaa tätä korkeampi höyrystys myös ilman kivihiihtä. Kuorilinjan maksimikapasiteetti on 24 kg s⁻¹. (Stora Enso 2018)

2.4 Hiilen syöttölaitteisto

Kuten edellä mainittiin, löytyy kattila 6:n yhteydestä polttoaineen syöttöjärjestelmä biomassan lisäksi myös kivihiihelle. Tämä järjestelmä pitää sisällään kaksi 400 m³ hiilisiiloa, sekä siilojen purkamiseksi kaksi kolaraappakuljetinta. Niiden avulla hiili siirretään painovoimaisesti purkautuvasta siilosta kuoren kolakuljettimille, joissa se sekoittuu kuorivirtaan ja päättyy lopulta sulkusyöttimien kautta kattilaan. Hiilisiilo ja sitä purkava kolaraappakuljetin on näkyvissä kuvassa 2.1a Hiilen virtausta kolakuljettimelle mitataan molemmille raappakuljettimille asennetuilla radiometrisillä vaa'oilla. Kattilan tuorehöyryn painesäätö ohjaa hiilen syöttöä kuoren kolakuljettimille. Mikäli kuorilinjassa ilmenee ongelmia, esimerkiksi siilojen holvautumista, jonka johdosta polttoainetta ei saada kattilaan riittävästi, hiilikuljetimet käynnistetään automaattisesti. Hiiltä käytetään tukena myös mikäli biopolttoaineen lämpöarvo on jostain syystä huomattavasti tavallista matalampi. (Stora Enso 2018)

Hiilen raappakuljetinten suurin kokonaiskapasiteetti on 7 kg s⁻¹. Laitteiston alkuperäinen mitoitettu massavirta täyden 60 kg s⁻¹ höyrystyksen saavuttamiseksi on 6,2 kg s⁻¹, joka on varsin lähellä linjan maksimikapasiteettia.

Kivihiihi on varastoitu tehdasalueella ulkona sijaitsevaan varastokasaan. Kasaa puretaan voimalaitokselle tarpeen mukaan kuorma-autolla. Polttoaine siirretään kattilalaitoksen siiloihin autonpurkuaseman kautta. Asemalta hiili kulkee kaksivaiheisen murskauksen läpi



(a) Hiilisiilon pohja sekä siiloa purkava kolaraap-**(b)** Hiilisiilojen eritstetyt yläosat laitoksen ulkopakuljetin (Sivonen 2019)

Kuva 2.1. Kivihiilen syöttölaitteistot

hihnakuljettimia pitkin siilojen jakokuljettimelle ja sitä kautta siiloihin. Tavallisesti siilot pyritään pitämään lähes tyhjinä johtuen laitoksella havaitusta itsesyttymisriskistä, joka koskee kosteaa kivihiiltä. (Stora Enso 2018)

3 BIOPOLTTOAINEET

Työssä keskitytään kolmeen potentiaaliseen polttoainevaihtoehtoon, jotka ovat puupelletti, torrefioitu pelletti sekä palaturve. Mainitut polttoaineet valikoituivat tarkastelun kohteeksi voimalaitoksen käyttöinsinöörin kanssa käytyjen alustavien soveltuvuusarvioiden jälkeen. Voimalaitoksella on aikaisemmin testattu muun muassa jyrshinturvetta, mutta se todettiin epäsopivaksi kyseiselle laitteistolle. Näin ollen turpeen osalta sitä ei käsitellä.

3.1 Kivihiili

Hiili on yleisnimitys polttoaineille, jotka sisältävät paljon alkuainehiiltä. Ne on jaoteltu ominaisuuksien mukaan tyypillisesti kivihiiliin ja ruskohiiliin. Ruskohiili on kivihiilen esiaste, joka on ehtinyt muodostua lyhyemmän aikaa verrattuna varsinaiseen kivihiileen. Varsinaiseksi kivihiileksi luokitellaan antrasiitti ja bituminen hiili. Hiilen käyttötarkoitus jakaa bitumisen hiilen vielä höyryhiileen sekä metallurgiseen hiileen. Nimensä mukaisesti höyryhiiltä käytetään höyryntuotannossa polttoaineena.

Kivihiili on sedimenttikiveä, joka on muodostunut turpeesta, eli hajonneesta orgaanisesta aineesta, erinäisistä mineraaleista sekä vedestä. Merkittävä osa maailman hiilivarannoista on muodostunut 360 - 290 miljoonaa vuotta sitten, suoalueiden jäätyä erilaisten luonnonmullistusten seurauksena syvälle maakerrosten alle. Kivihiilen muodostuminen alkoi, kun hapettomiin olosuhteisiin joutunut biomassa muuttui turpeeksi maakerrosten välissä. Ajan kuluessa turve alkoi muuttua hiileksi vallitsevan paineen ja lämpötilan seurauksena. Turpeen hiiltymisaste riippuu mainituista olosuhteista sekä hiiliesiintymän iästä, joten se kuinka pitkälle hiiltymisprosessi on edennyt, vaihtelee esiintymittäin. (Alakangas et al. 2016). Ruskohiileksi kutsutaan turpeesta muodostunutta kivihiilen esiastetta. Se on rakenteeltaan vielä pehmeää verrattuna varsinaiseen kivihiileen. Ruskohiiltä käytetään myös polttoaineena esimerkiksi Saksassa, jossa sijaitsee suuria ruskohiiliesiintymiä. Hiiltymisprosessin jatkuessa ruskohiilestä muodostuu puolibitumista hiiltä ja edelleen bitumista hiiltä. Prosessin aikana muodostuvan hiilen kosteus- ja happipitoisuus laskee sekä vastaavasti hiilipitoisuus ja lämpöarvo kasvaa. Mikäli olosuhteet ovat optimaaliset prosessille, muodostu bitumisesta hiilestä lopulta antrasiittia, joka on lähes puhdasta alkuainehiiltä. Hiilen laatuluokan määrää se, kuinka pitkälle hiiltymisprosessi on edennyt. Laatuluokka kuvaa orgaanisen aineen muuttumista hiileksi, eli hiiltymisastetta. Korkeimpaan laatuluokkaan kuuluu yli 90% hiilipitoisuudella antrasiitti. Sen jälkeen laskevassa järjestyksessä tulee bituminen ja puolibituminen hiili, joiden hiilipitoisuus on 70-90 %, sekä

viimeisenä ruskohiili alle 70% hiilipitoisuudella. (Alakangas et al. 2016).

Suomessa käytetään yleisesti termejä kivihiili tai voimalaitoshiili kuvaamaan höyryhiiltä. Metallurgista hiiltä käytetään raaka-aineena koksen tuotannossa esimerkiksi terästeollisuuden käyttöön. Höyryhiili on määrällisesti merkittävin Suomessa käytettävä hiilituote ja sen vuosittainen tuonimäärä on viime vuosina vaihdellut 2,8-5,9 miljoonan tonnin välillä. Suomessa poltettava voimalaitoshiili on poikkeuksetta bitumista hiiltä ja se tuodaan suurimmaksi osaksi Venäjältä. Pienempiä määriä hiiltä on tuotu myös Puolasta ja Kazakistanista. Ennen vuotta 2012 hiiltä tuotiin myös Kolumbiasta sekä Yhdysvalloista, mutta nykyisin tuonti on lakannut. (Alakangas et al. 2016).

Varkauden tehtailla käytettävä kivihiili on pääasiassa peräisin Venäjältä ja sen lämpöarvo on noin $6,66 \text{ MW h t}^{-1}$. (Stora Enso)

3.2 Puupelletti

Puupelletti on kiinteä polttoaine, jota valmistetaan puristamalla murskattua biomassaa sylinterin muotoisiksi kappaleiksi. Raaka-aineena pellettien valmistamisessa eli pelletöinnissä käytetään usein mekaanisen metsäteollisuuden kuivia sivuvirtoja, kuten sahoilla ja höyläämöillä syntyvää purua, pölyä ja lastuja. Sivuvirroista saatava raaka-aine on usein kuivaa, mutta pellettejä voi valmistaa myös tuoreesta biomassasta kuten metsähakkeesta ja puun kuoresta. Tällöin biomassaa vaatii kuitenkin kuivaamisen ennen pelletöintiä. Metsähake voi sisältää muun muassa haketettuja oksia, jatkojalostukseen kelpaamattomia puun runkoja sekä muita metsätähteitä (Alakangas et al. 2016, s. 95)

Pelletin valmistusprosessissa biomassaa murskataan ensin sopivaan raekokoon riippuen valmistettavan pelletin halkaisijasta. Mikäli raaka-aine on kosteaa ja sen kuivaamiselle on tarvetta, kuivaus suoritetaan ennen murskausta. Kuivaus voidaan suorittaa myös murskauksen yhteydessä erityisissä jauhinkuivaimissa. Varsinainen pelletti muodostetaan puristamalla murskattu biomassaa metallisen reikälevyn eli pelletöintimatriisin läpi. Pelletin valmistuksessa ei yleensä tarvita lisäaineita, koska puun sidosaineena toimiva ligniini sitoo myös puristetun pelletin muotoonsa. Pellettipuristimessa murskattu puu lämpenee, kun se kulkee pelletöintimatriisin läpi. Lämpenemisen myötä raaka-aineen ligniini sulaa. Kun pelletti on muodostunut, ligniini jäähtyy kovettaen biomassan uuteen muotoon. Näin ollen tuotettujen pellettien jäähdytys puristuksen jälkeen on erityisen tärkeää niiden koossapysyvyyden kannalta. (Alakangas et al. 2016, s. 95)

Tavallisesti Suomessa valmistettu pelletti on mitoiltaan 10-30 mm pitkä ja sen halkaisija on 8 mm ja sen irtotiheys on $640\text{-}690 \text{ kg m}^{-3}$. Pellettitonin tehollinen lämpöarvo on $4,7\text{-}5,0 \text{ MW h}$, kun kosteus on 5-10 m-% ja tilavuus noin $1,5 \text{ m}^3$. Energiatiheys pelletille on $2,6\text{-}3,4 \text{ MW h m}^{-3}$. Pelletit kestävät huonosti kosteutta ja joutuessaan kosketukseen veden kanssa ne menettävät muotonsa ja hajoavat. (Alakangas et al. 2016, s. 96-97) Näin ollen pellettien varastointi esimerkiksi ulkotiloissa ilman erillistä suojaa vedeltä ja kosteudelta ei ole mahdollista. Pellettien laatuluokat määritellään kansainvälisessä puupellettis-

tandardissa SFS-EN ISO 17225-2:2014. Teollisuuden käyttöön tarkoitetuille pelleteille on määritetty laatuluokat I1, I2 ja I3 (Alakangas et al. 2016, s. 96-97).

Stora Enso Oyj:n omalla sahalaiteksella Kiteellä valmistetaan puupellettiä. (Stora Enso 2019) Yhtiö on ilmoittanut harkitsevansa Kiteen sahan sulkemista vuoden 2019 aikana ja sen tuotannon keskittämistä Varkauden sahalle. (Kauppalehti 2019) Ei ole tiedossa siirtykö myös pellettituotanto Varkauteen, mutta siirtyminen voisi mahdollistaa pellettien valmistamisen omaan käyttöön tarvittaessa paikan päällä.

Pelletti varastoidaan kattilalaitoksen alueella yleensä silloissa. Varastosiilon tulee olla venttiivis, sillä pelletti turpoaa kastuessaan noin 3-4 kertaiseksi ja näin ollen voi aiheuttaa ongelmia siilon purkamisessa sekä aikaansaada siilon holvautumista. Siiloon varastoidun pelletin kosteuteen tulee kiinnittää huomiota, koska kosteus polttoaineessa saa aikaan mikrobiologista ja kemiallista hajoamista. Hajoamisen aiheuttaa puumassassa tapahtuvat hapettumisreaktiot, jotka kuluttavat happea suljetusta siilosta ja tuottavat sinne hääkää ja hiilidioksidia. (Stelte 2012) Näin ollen siiloon tai siihen suorassa yhteydessä oleviin tiloihin mentäessä tai siellä työskennellessä on varmistuttava, että tila on tuuletettu ja ilman happipitoisuus on riittävä. Mikrobin aiheuttama hajoaminen tuottaa lämpöä, joten pellettimassan lämpötila kohoaa silloissa. Puun lämmönjohtavuus on heikko, joten lämpö ei pääse tehokkaasti poistumaan siilosta. Tämän seurauksena lämpötila nousee pellettimassan sisällä. Pellettien seassa vaikuttavasta mikro-organismista riippuen lämpötila voi nousta jopa 80°C:seen. (Stelte 2012) Lämmön varastoituminen pellettimassaan kohottaa itsesyttymisriskiä, joten se on otettava huomioon.

Mikäli syttymä tapahtuu pellettisiilossa, sen havaitseminen nopeasti sekä sammuttaminen voi olla hankalaa. Sammutteena ei voida käyttää vettä, johtuen pelletin turpoamisesta. Turvotessaan pellettimassa voi pahimmillaan aiheuttaa siilon repeämisen. Hajonnutta pellettipatjaa on myös haastava poistaa siilosta ja se estää tehokkaasti pääsyn siilon keskelle, jossa syttymä oletettavasti sijaitsee. Tällaisissa paloissa on tehokkaampaa käyttää esimerkiksi kaasusammutusjärjestelmää tai vaahtoa. (Stelte 2012) Siilon nopea tyhjentäminen on myös yksi tapa päästä käsiksi palopesäkkeeseen, mutta laitosympäristössä, suuren siilon ollessa kyseessä, se voi olla hyvin vaikeaa.

Pellettisiilojen tilaa voidaan valvoa mittaamalla sisälämpötilaa. Tämän lisäksi siilosta poistuvaa kaasua voidaan analysoida ja mitata esimerkiksi hiilidioksidi ja savupitoisuutta. Hääkää ja hiilidioksidia muodostuu pellettimassassa jo matalissakin lämpötiloissa massassa tapahtuvan hapettumisen seurauksena. Pellettisiiloja tulisikin pystyä tuulettamaan tarvittaessa, näin voidaan poistaa siilosta kosteutta ja myös jäähdyttää pellettimassaa. Pellettisiilon lämpötila tulisi pitää alle 45 celsiusasteessa (Stelte 2012).

3.3 Torrefioitu pelletti

Torrefioitu pelletti on valmistettu kuten tavallinen puupelletti, puristamalla biomassaa pelletöintimatriisin läpi. Raaka-aineena käytettävä biomassa on kuitenkin torrefioitua eli vah-

vasti lämpökäsiteltyä. Torrefiointi on termokemiallinen prosessi, jossa biomassaa paahdetaan noin 200 - 300 C lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. (Bergman 2005) Se on verrattavissa kevyeen pyrolyysiin ja se asettuu periaatteessa kuivauksen ja hiillytyksen välille. Raaka-aineesta erottuu prosessissa monia haihtuvia yhdisteitä, jotka muodostuvat biomassan hajotessa. Haihtuvien yhdisteiden mukana alkuperäisen raaka-aineen massasta poistuu noin 30% ja jäljelle jäävää kiintoainetta kutsutaan torrefioiduksi biomassaksi. Raaka-aineen sisältämästä kokonaisenergiasta noin 90% jää kiintoaineeseen ja loppuosa sisältyy haihtuviin yhdisteisiin, eli torrefiointikaasuihin. (Bergman 2005)

Torrefiointiprosessi voidaan jakaa viiteen vaiheeseen, jotka ovat: esilämmitys, esikuivaus, kuivaus ja biomassan lämmitys, torrefiointi sekä jäähdytys. Esilämmitysvaiheessa biomassaa lämmitetään siihen pisteeseen, että kosteus alkaa haihtua. Lämpötilaa nostetaan, kunnes vesi alkaa höyrystyä ja poistuu biomassasta. Kuivauksen viimeisessä vaiheessa raaka-ainetta lämmitetään lähelle torrefiointilämpötilaa eli noin 200C:seen. (Stelte 2015) Kuivausvaiheessa voidaan vaikuttaa torrefiointikaasujen energiasisältöön, eli näin ollen myös valmiin tuotteen energiapitoisuuteen. Mitä kosteampana biomassaa tuodaan torrefiointivaiheeseen, sitä enemmän sen energiasisällöstä poistuu haihtuvien yhdisteiden mukana. (Bergman 2005) Torrefiointivaiheessa vallitsee hapettomat olosuhteet ja lämpötila on yleensä 270-310C riippuen siitä, millaisia biomassan ominaisuuksia pyritään saavuttamaan. Korkeassa lämpötilassa raaka-aineen sisältämät biolpolymeerit alkavat hajoamaan ja haihtuvat muodostaen niin sanottua torrefiointikaasua. Hemiselluloosat ovat merkittävän torrefiointivaiheen aikana haihtuvista yhdisteistä. Lopuksi torrefioitu biomassaa täytyy jäädyttää alle 200C:seen. Poistuessaan paahtovaiheesta happirikkaisiin olosuhteisiin voi tapahtua itsesyttymistä, mikäli biomassaa on edelleen korkeassa lämpötilassa. (Stelte 2015) Näin ollen jäähdytysvaihe on tärkeä paloturvallisuuden kannalta, mutta riski ei käytännössä ole loppukäyttäjän ongelma, mikäli pellettejä ei tuoteta laitosalueella.

Torrefioitua biomassaa ei yleensä ole järkevää kuljettaa tai varastoida, vaan siitä valmistetaan tavallisesti pellettejä tai brikettejä. Näin saadaan tuotteen energiatihyyttä nostettua, jolloin polttoaineen hyödyntäminen on helpompaa ja kuljettaminen kannattavampaa. Paahtamisen yhteydessä biomassasta tulee hydrofobisempaa, eli se kestää kosteutta paremmin kuin torrefioimaton biomassaa. Näin ollen torrefioitu pelletti sietää myös vettä ja kosteutta enemmän kuin perinteinen puupelletti. Hydrofobisuuden ansiosta pellettejä voidaan säilyttää kohtalaisia aikoja myös ulkona alttiina sateelle ja kosteudelle. Ulkosäilytys kasassa ei kuitenkaan ole suositeltavaa (Järvinen et al. 2014) Torrefioidussa pelletissä tapahtuva biologinen hajoaminen on merkittävästi hitaampaa kuin perinteisessä puupelletissä. Pelletöinnin laatu vaikuttaa merkittävästi pelletin kosteudenkestoon. Mikäli pelletin pinta on tiivis ja kiiltävä, se kestää vettä pidempään, kuin huonolaatuisempi pelletti, jonka pinta on murtunut. (Stelte 2015)

Torrefiointi tekee biomassasta hyvin haurasta, jonka ansiosta se soveltuu hyvin pölypolttoon. Hyvästä jauhautuvuudesta aiheutuu kuitenkin myös haittoja, jotka ilmenevät esimerkiksi tarpeettomana pölyn ja hienoaineen muodostumisena pellettejä liikuteltaessa kuljettimilla. Kuten tavallisten puupellettienkin kohdalla kuljettimia suunniteltaessa tulee

pyrkiä mahdollisimman hellävaraiseen kuljetukseen. Torrefioidun pelletin kanssa erityisesti mekaanista rasitusta, kuten pudotuksia ja hiertymistä, tulee välttää johtuen pellettien hauraudesta. Pneumaattinen kuljetus soveltuu myös torrefioitujen pellettien kanssa käytettäväksi. (Stelte 2015)

Tulipalon sattuessa pellettisiilon sammuttamisessa voidaan tavallisesta pelletistä poiketen käyttää myös vettä, koska torrefioitu pelletti ei turpoa kastuessaan. (Stelte 2015) Kuten aikaisemmin mainittiin, torrefioitu biomassa on haurasta ja hajoaa herkästi mekaanisessa rasituksessa pölyksi. Johtuen matalasta kosteuspitoisuudesta ja pölyn hienojakaisuudesta se muodostaa pölyräjähdysvaaran suljettuihin tiloihin, kuten silloihin tai kuljettimille. (Stelte 2015, Järvinen at al. 2014) Hieno pöly myös syttyy herkästi ulkoisesta kipinästä, joten se on otettava huomioon käsittelylaitteita suunnitellessa. Johtuen biomassan hydrofobisuudesta ja matalasta kosteuspitoisuudesta, biologista hapettumista tapahtuu torrefioidussa pelletissä merkittävästi vähemmän verrattuna puupellettiin. Näin ollen pellettimassa lämpeneminen ja itsesytyminen ei pitäisi olla yhtä suuri riski kuin perinteisellä pelletillä. Tutkimustietoa aiheesta on kuitenkin vielä varsin vähän (Stelte 2015).

Torrefioidun pelletin tehollinen lämpöarvo on noin $4,9\text{--}6 \text{ MW h t}^{-1}$, eli noin 10% korkeampi kuin tavallisen puupelletin. Näin ollen myös energiatiheys on suurempi, noin $4,0 \text{ MW h m}^{-3}$. (Järvinen at al. 2014) Tämä mahdollistaa suuremman energiamäärän varastoinnin samoihin silloihin verrattuna puupellettiin. Termisiltä ominaisuuksiltaan torrefioitu pelletti on lähempänä kivihiiltä, joten sitä voidaan pitää potentiaalisena vaihtoehtona. Pelletin saatavuus Suomessa lienee kuitenkin varsin heikko johtuen teknologian kehitysvaiheesta. Maailman ensimmäinen höyryräjäytykseen perustuva torrefiointilaitos on suunniteltu käynnistyväksi Ranskassa vuonna 2020. Laitoksen suunniteltu kapasiteetti on 120 000 t/a. (Valmet 2018) Myös Viroon on valmisteilla torrefioitua pellettiä tuottava laitos, joka on suunnitellulta kapasiteetiltaan hieman suurempi, kuin aikaisemmin mainittu. (Timber Industry News 2018) Näin ollen on oletettavissa, että torrefioidun pelletin saatavuus tulisi paranemaan tulevaisuudessa. Epävarmuudesta johtuen voidaan pohtia myös olisiko esimerkiksi biomassan torrefiointi ja pelletöinti tehtaan alueella kannattava ratkaisu. Voitaissiinko pellettien tuotannossa hyödyntää tehtaan prosessien hukkalämpöä tai sivuvirtoja, kuten sahanpurua tai haketta. Tämä aihe vaatisi tarkempaa tutkimusta, joten sitä ei käsitellä tässä työssä sen enempää.

3.4 Palaturve

Turve on orgaaninen maalaji, joka muodostuu suokasvustosta epätäydellisen hajoamisen seurauksena. Turpeen muodostuminen vaatii kosteat ja hapettomat olosuhteet. Soilla turvetta syntyy hitaasti pintakasvuston hajotessa ja sen kerrostuessa muodostumisalueelle. Määritelmän mukaan turpeeksi voidaan kutsua maalajia, jossa eloperäisen aineen pitoisuus kokonaiskuiva-aineesta on vähintään 75% (GTK 2010)

Suomessa turvetta käytetään enimmäkseen energiantuotannossa. Energiakäytön osuus

turpeen kokonaiskäytöstä on yli 90%. Suomessa on turvemaita noin 9,2 miljoonaa hehtaaria. Hieman yli puolet turvemaista eli noin 4,8 miljoonaa hehtaaria on ojitettuna metsätalouden käytössä, minkä lisäksi noin kolmasosa turvealueista on käyttämätöntä joutomaata. Turvesoiden suojeleohjelmassa on mukana noin 1,1 miljoonaa hehtaaria turvemaista. Varsinaisessa turvetuotannossa on noin 0,06 miljoonaa hehtaaria. (GTK 2010) Geologian Tutkimuskeskuksen raportin mukaan Suomen potentiaalisten energiaturvevarantojen kokonaisenergiasisältö on 12800 TW h. (Virtanen et al. 2003 s.99)

Palaturpeeksi kutsutaan turvetta, joka on puristettu suuttimen avulla tietyn muotoiseksi palaksi. Yleisimmät muodot ovat sylinteri- tai lainepala. Palan halkaisija on tyypillisesti alle 80 mm, mutta pituus vaihtelee.

Palaturvetta tuotetaan yleensä traktoriin kytketyllä palaturvekoneella, joka hoitaa turpeen noston, muokkauksen ja palan muodostuksen. Koneella tehdään turvekenttään, eli turvetuotantoalueeseen, 0,5 metrin syvyinen kapea ura, josta turve nostetaan muokattavaksi. Turve nostetaan yleensä kiekko- tai ruuvityyppisellä nostokoneella, joista kiekkotyyppinen on Suomessa yleisimmin käytetty. Noston jälkeen turvetta muokataan, eli sitä käsitellään mekaanisesti parempien ominaisuuksia saavuttamiseksi. Laboratoriokokeiden perusteella on todettu, että ruuvityyppinen nostokone on parempi turpeen muokkauksen kannalta. Nostoruuvien käyttö lisää hienojakoisten turvehiukkasten määrää turvemassassa, mikä mahdollistaa hyvälaatuisen palan muodostumisen. (Alakangas et al. 2011, s.45-46) Muokkauksessa pyritään saamaan raakaturpeesta mahdollisimman tasalaatuinen massa, jolla on sopiva raekoko eikä se sisällä kuitukimppuja. Muokattu turvemassa johdetaan suuttimeen, jossa muodostetaan halutunlainen pala. Tyypillisesti se on joko lyhyt sylinterimäinen pala tai katkeamaton aaltoa muistuttava lainepala. Palan poistuessa suuttimesta siinä on yleensä paljon vettä, joten se hajoaa herkästi. Tästä syystä palaturpeen annetaan kuivua auringossa turvekentällä ennen kuin se kerätään pois. (Alakangas et al. 2011, s. 46-47)

Kuivuessaan turvepala saavuttaa lopullisen muotonsa. Veden poistuessa pala kutistuu, eli sen tiheys kasvaa sekä lujuusominaisuudet paranevat. Muokkauksen yhteydessä mainitut hienojakoiset turvepartikkelit vaikuttavat merkittävästi palan tihenemiseen. Mitä korkeampi hienoainepitoisuus turvemassassa on, sitä enemmän siitä muodostettu pala kutistuu kuivuessaan. (Alakangas et al. 2011, s. 50) Näin ollen turvemassan muokkaus on tuotannon tärkeimpiä vaiheita palaturpeen laatuominaisuuksien kannalta. Palan ominaisuuksiin vaikuttaa myös käytetyn turpeen maatumisaste, jota kuvataan von Postin kymmenportaisella asteikolla. Asteikossa H1 tarkoittaa täysin maatumatonta ainesta ja H10 turvetta, joka on täysin maatunut (Alakangas et al. 2011, s. 98). Mikäli raaka-aineen maatumisaste on korkea, eli von Postin asteikolla yli H7, eikä sisällä enää kuitumaista ainesta, palan tiheys kasvaa kuivuessa voimakkaasti ja sen mekaaninen kestävyys heikkenee. Matalan maatumisasteen raaka-aineessa on paljon enemmän kuituja, joten sen johdosta pala ei juurikaan kutistu kuivumisen aikana ja jää huokoiseksi. (Alakangas et al. 2011, s. 50)

Palaturpeen kosteus laitokselle toimitettaessa on yleensä alle 40 %, tässä kosteudes-

sa keskimääräinen tehollinen lämpöarvo on $3,47 \text{ MW h t}^{-1}$. Lämpöarvo on varsin matala johtuen suhteellisen korkeasta kosteuspitoisuudesta. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo palaturpeelle on keskimäärin $5,94 \text{ MW h t}^{-1}$. Palaturpeen energiatiheys on noin $1,27 \text{ MW h m}^{-3}$. Polttoaineena turve sijoittuu ominaisuuksiensa perusteella puupolttoaineiden ja kivihiilen välille. Tilastokeskuksen luokituksessa palaturpeen hiilidioksidipäästökerroin on $103,2 \text{ g MJ}^{-1}$ (Tilastokeskus 2019).

4 VAADITTAVAT MUUTOKSET

Kappaleessa käsitellään korvaavien polttoaineiden käyttöön liittyviä massavirtoja sekä nykyisten kuljettimien kapasiteettia. Lisäksi selvitetään laitostoimittajilta millaisia ratkaisuja mainittujen polttoaineiden käsittelyyn on olemassa ja mitä tulisi ottaa huomioon muutoksia suunniteltaessa.

4.1 Tarvittavat polttoaineen massavirrat

Kivihiiltä korvaavien polttoaineiden lämpöarvot ja energiatheydet ovat matalampia kivihiilen vastaaviin arvoihin verrattuna, joten halutun polttoainetehon saavuttamiseksi tulee korvaavia polttoaineita syöttää kattilaan enemmän. Tutkittavien polttoaineiden ominaisuudet on listattu taulukkoon 4.1. Taulukon arvot on otettu keskiarvona kappaleessa 3 mainitusta vaihteluväleistä. Taulukosta voidaan huomata, että torrefioitu pelletti on energiasisällöltään paras polttoaine ja palaturve heikoin. Turpeen heikon tehollisen lämpöarvon aiheuttaa kappaleessa 3 mainittu korkea kosteus saapumistilassa. Mikäli turvetta kuivataan tai sen annetaan kuivua ennen polttoa, se parantaa tehollista lämpöarvoa huomattavasti. Torrefioitun pelletin korkeita arvoja selittää niin ikään polttoaineen kosteus, joka tuotantotavasta johtuen on hyvin matala.

Jotta voidaan arvioida tarvittavia muutoksia nykyisiin kivihiilen syöttölaitteistoihin, täytyy tietää, millaisella massavirralla uusia polttoaineita tulee syöttää kattilaan, jotta saavutetaan tarvittava polttoaineteho. Korvaavien polttoaineiden teholliset lämpöarvot tiedetään, joten tiettyyn polttoainetehoon vaadittava polttoaineen massavirta voidaan laskea jakamalla polttoaineteho lämpöarvolla. Massavirtaa vastaava polttoaineen tilavuusvirta saadaan laskettua jakamalla polttoaineteho polttoaineen energiatheydellä. Tilavuusvirralla on suuri merkitys, koska se vaikuttaa syöttölaitteiden fyysiseen kokoon merkittävästi. Taulukkoon 4.2 on laskettu kullekin polttoaineelle tarvittava massavirta sekä tilavuusvirta, kun tiedetään, että kattilan tarvitsema polttoaineteho on suurimmillaan 170 MW.

Taulukko 4.1. Tutkittujen polttoaineiden lämpöarvot ja energiatheydet.

| Ominaisuus | Puupelletti | Torrefioitu pelletti | Palaturve |
|---|-------------|----------------------|-----------|
| Tehollinen lämpöarvo [MW h t^{-1}] | 4,85 | 5,45 | 3,47 |
| Energiatiheys [MW h m^{-3}] | 3,00 | 4,00 | 1,27 |

Taulukko 4.2. Polttoaineille lasketut massa- ja tilavuusvirrat.

| Ominaisuus | Puupelletti | Torrefoitu pelletti | Palaturve |
|--|-------------|---------------------|-----------|
| Massavirta [kg s^{-1}] | 9,73 | 8,66 | 13,60 |
| Tilavuusvirta [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] | 56,66 | 42,50 | 133,85 |
| Tilavuusvirta [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] | 0,016 | 0,012 | 0,037 |

4.2 Kuljettimet

Nykyisten syöttölaitteistojen ja silojen soveltuvuutta uusille polttoaineille selvitetiin tiedustelemassa asiaa laitevalmistajilta. Lausuntoja pyydettiin puhelinhaastattelun muodossa BMH Oy:n sekä Andritz Oy:n edustajilta. Polttoaineiden syöttölaitteistot kuuluvat molempien mainittujen yritysten tuotevalikoimaan.

Pellettien varastoinnissa siloissa tulee ottaa huomioon turvallisuusnäkökulmat ja suorittaa tarvittavat ATEX-tarkastelut uusille polttoaineille, jotka liittyvät muun muassa pölyräjähdysten estämiseen. Tarkastelun pohjalta siloihin täytyy tehdä tarvittavat muutokset, kuten esimerkiksi räjähdysluukkujen asennus tarvittaessa. (Markku Rauhanen 2019) Laitoksen siloista löytyy höyrysammutusjärjestelmä, jonka soveltuvuutta kullekin polttoaineille tulee myöskin tarkastella. Puupelletin osalta vettä ei voida hyödyntää pelletin turpoamisesta johtuen. Kappaleessa 3 mainittiin pellettisiilojen yhteydessä kaasusammutusjärjestelmä, jossa sammutukseen käytetään typpeä. Tällainen järjestelmä sopii myös puupelletille, koska sammutus ei ole nestemäistä eikä aiheuta pellettien turpoamista. Kivihiltä käsitellessä syntyy myös pölyä, joten nykyiset kolaraappakuljettimet ja silon pohja on varustettu kipinäilmaisimilla, jotka on liitetty kattilan turva-automaatiojärjestelmään sekä tehtaan paloilmoitinjärjestelmään. Kuvassa 4.2 näkyy, että kipinäilmaisimien on sijoitettu raappakuljettimen päälle. Hiilisiilon pohjaan asennetut ilmaisimet näkyvät kuvassa 2.1a. Kipinäilmaisinjärjestelmä olisi käytössä myös uusien polttoaineiden hyödynnettäessä. Kappaleessa 3 mainitaan myös silojen ilmanlaatua mittaava järjestelmä, jolla voidaan havainnoida silossa tapahtuvia reaktioita. Tällainen järjestelmä löytyy myös laitoksen hiilisiiloista ja sillä mitataan silojen CO- pitoisuutta.

Kivihiihen purkuun käytettävä kolaraappakuljetin voisi Andritz Oy:n sekä BMH Oy:n edustajien mukaan soveltua myös uusien polttoaineiden syöttämiseen varsinkin pellettien osalta, koska pelletti purkautuu itsestään silosta. (Rauhanen 2019 ja Yrjölä 2019) Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon raappakuljettimen asento, koska pelletti myös valuu itsestään. Laitoksen kuljettimet ovat yläviistossa, joten voi olla mahdollista, että polttoainepatjan pinnalta pelletit saattaisivat liukua takaisin kuljettimen alapäähän. Raappakuljetin voisi toimia myöskin palaturpeelle, mutta ongelmaksi muodostuu se, ettei turve purkaannu silosta itsestään. Näin ollen turve vaatii Rauhasen mukaan erillisen purkaimen. Ruuvityyppinen purkain soveltuu haastateltujen mukaan kaikille mainituille polttoaineille (Rauhanen 2019 ja Yrjölä 2019). Molempien yritysten ratkaisut käyttävät silon purkamiseen ruuvipurkainta. Tällainen purkain olisi todennäköisesti asennettavissa laitoksen hiilisiiloihin nykyi-



Kuva 4.1. Kolaraappakuljettimen kipinäilmaisim (Sivonen 2019)



Kuva 4.2. Siilon pohjalle tarkoitettu ruuvipurkain (Gilbert Products Inc 2019)

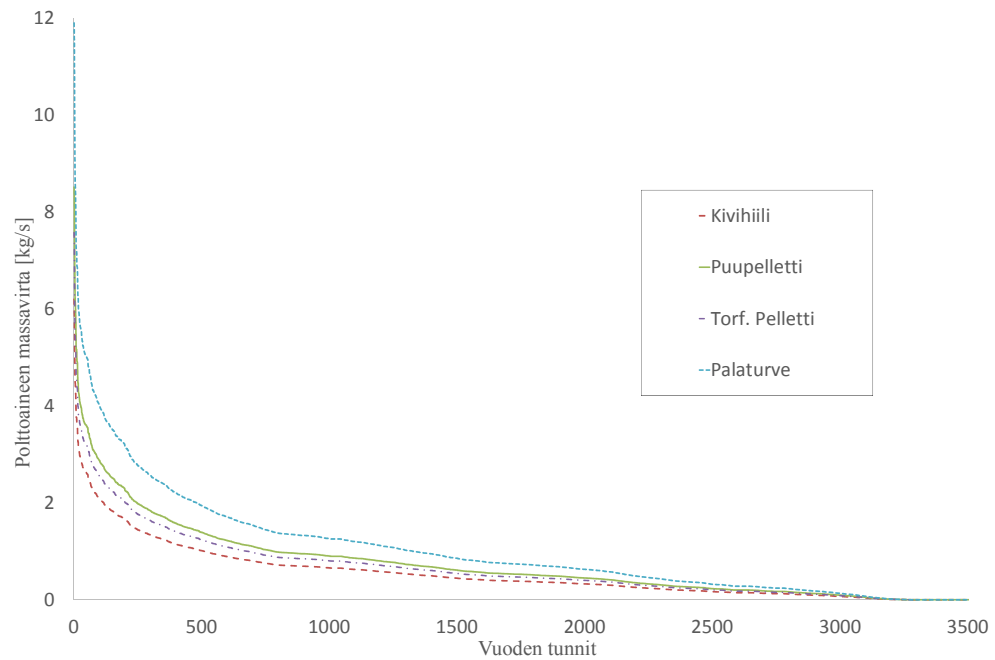
seen raappakuljettimelle tarkoitetun pohjan tilalle. Purkaimelta polttoaine voidaan siirtää seuraavalle kuljettimelle käyttämättä hihnakujuetinta. Rauhasen mukaan yleensä pyritään käyttämään hihnakujuettimeja, mikäli nousukulmat ovat sopivat ja kujuetinlaitteisto mahtuu kyseiseen tilaan. Kujuettimen varustelussa tulee ottaa huomioon siirrettävän polttoaineen pölynmuodostus, jolloin kohdat, joissa polttoaine siirtyy pinnalta toiselle, olisi tarvittaessa varustettava pölynpoistojärjestelmällä. (Rauhanen 2019) Käytettäessä hihnakujuetinta voidaan siirrettävää massavirtaa mitata käyttämällä hihnavaakaa.

Yrjölän mukaan muutostarvetta voidaan arvioida tarkemmin laitostoimittajan toimesta, kun saadaan käyttöön laitoksen nykyinen layout-kuva sekä tiedot tarvittavista polttoainevirtauksista ja halutusta polttoaineesta. Näiden pohjalta laitostoimittaja voi tehdä tarjouksen, jonka kautta saadaan myös tietoa muutosten aiheuttamista kustannuksista.

4.3 Kuljettimien kapasiteetti

Voimalaitokselle asennetut kivihiilen syöttölaitteet on mitoitettu maksimissaan 8 kg s^{-1} kokonaismassavirralla, eli molemmat hiilikuljettimet yhteenlaskettuna. Näin ollen yhden linjan kapasiteetti on 4 kg s^{-1} , joka on asetettu kattilan automaatiojärjestelmässä ylähälytysrajaksi. Syöttölaitteiden dokumentaatioissa mainitaan, että kolaraappakuljettimen kolaketjun maksiminopeus on $0,055 \text{ m s}^{-1}$ ja siirrettävän polttoainepatjan korkeus on maksimissaan 205 mm. (Stora Enso 2018) Näin ollen kuljettimen leveyden ollessa 1 m, voidaan laskea suurin mahdollinen yhden kuljettimen siirtämä tilavuusvirta ja sitä kautta kokonaistilavuusvirta. Molempien linjojen teoreettiseksi maksimitilavuusvirraksi saadaan näillä lähtötiedoilla $0,02255 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Verrattaessa tulosta taulukkoon 4.2 kirjattuihin tilavuusvirtoihin, voidaan todeta kuljetuskapasiteetti tilavuusvirran kannalta riittävän suureksi pelleteille, joskin tarvittavat massavirrat ylittävät kuljetinten kokonaiskapasiteetin. Turpeen kohdalla vaadittava tilavuusvirta on suurempi kuin kuljettimille mahtuva tilavuusvirta. Näin ollen nykyiset kuljettimet eivät kapasiteettinsa puolesta riitä uusille polttoaineille, mikäli halutaan saada tuotettua koko kattilan vaatima polttoaineteho tukipolttoaineella.

Haluttaessa käyttää vanhoja syöttölaitteita, kuten edellisessä alaluvussa todettiin mahdolliseksi, se voisi olla suurimman osan vuodesta mahdollista. Kattila 6:den vuoden 2017-2018 ajotietojen mukaan muodostettiin pysyvyyskäyrä hiilen massavirralla, joka on esitetty kuvassa 4.3. On tiedossa, että kivihiilen massavirran mittauksessa on virhettä, joka aiheuttaa liian suuria mittausrvoja. Käyrän tiedot on skaalattu käyttämällä hyväksi syöttölaitteistojen dokumentaatiosta löytyviä tietoja hiilen massavirrasta maksimihöyrystyksellä. Tämä on voitu tehdä, koska ajotiedoista löytyy tilanne, jolloin kattila käy täydellä teholla. Pysyvyyskäyrästä käy ilmi, että kattilaan syötettiin kivihiiltä noin 3300 tuntia vuodesta, eli käytännössä talvikuukausien keston ajan. Tänä aikana Keksimääräinen hiilen massavirta oli reilusti alle 2 kg s^{-1} . Näin ollen olisi mahdollista käyttää nykyistä laitteistoa myös uusilla polttoaineilla, suurimmassa osassa tilanteista, joissa tukipolttoainetta tarvitaan. Samaan kuvaan on myös laskettu kivihiilen pysyvyyskäyrää vastaavat massavirtakäyrät uusille polttoaineille. Tämä on tehty kertomalla kivihiilen massavirta kunkin polttoaineen lämpöarvojen suhteella, jolloin on saatu kunkin polttoaineen vastaava massavirta. Kun nykyisten kuljettimien suurin mahdollinen tilavuusvirta on tiedossa, voidaan energiatihyysien avulla laskea, mikä on suurin mahdollinen siirrettävä massavirta ja näin ollen voidaan arvioida, kuinka pitkälle nykyisillä laitteistoilla päästäisiin. Pellettien kohdalla todettiin, että kuljetinten massavirta on polttoaineen syöttöä rajoittava tekijä, joten 8 kg s^{-1} massavirralla saataisiin puupellettiä käyttämällä aikaan 139,7 MW ja torrefioitua pellettiä käyttämällä 156,9 MW polttoaineteho. Turpeen käyttöä rajoittaa massavirran lisäksi myös tilavuusvirta, jolloin 8 kg s^{-1} massavirralla tilavuusvirraksi saadaan $0,02185 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, joka teoriassa mahtuisi kuljettimille. Näin saatava polttoaineteho olisi 99,9 MW. Näin ollen voidaan todeta, että nykyisten kuljettimien käyttöä rajoittaa siirrettävä massavirta. On kuitenkin tärkeää muistaa, että massavirtauksen poikkileikkaus kuljettimella ei todellisuudessa ole suorakaiteen muotoinen, joten virtauspoikkipinta-ala on todellisuudessa pienempi kuin yllä mainittujen arvojen laskennassa käytetty suorakaiteen pinta-ala,



Kuva 4.3. Kattilaan syötetyn hiilen kokonaismassavirran pysyvyyskäyrä

joten myös polttoainetehojen arvot ovat todellisuudessa matalammat. Osittain epäselväksi jäi kuitenkin ovatko molemmat kuljetinlinjat kykeneviä kuljettamaan dokumentaatiossa mainitun 8 kg s^{-1} . Kattilan ohjausjärjestelmästä kävi ilmi, että yhden linjan massavirran ollessa lähellä 4 kg s^{-1} , kuljettimen ohjausarvo oli alle 50%. Näin ollen voi olla, että kuljettimien kapasiteetti on rajoitettu ohjausjärjestelmän avulla. Nykyiset kivihiilisilot ovat enimmäkseen tyhjiään ja niitä on täytetty tarpeen mukaan. Jos oletetaan, että korvaavia polttoaineita voisi varastoida silloissa siten, että ne olisivat täynnä, saataisiin polttoainetehoa reserviin puupelletillä 1200 MW h^{-1} , torrefioidulla pelletillä 1600 MW h^{-1} ja palaturpeella 508 MW h^{-1} . Palaturpeella reservi on merkittävästi pienempi kuin pelleteillä, johtuen sen heikosta energiatihydestä.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kivihiilen korvaaminen ei ole polttoaineiden osalta erityisen helppoa, johtuen kivihiilen ylivoimaisesti korkeimmasta lämpöarvosta ja energiatihydestä sekä muista ominaisuuksista. Työssä tutkituista polttoaineista, eli puupelletistä, torrefioidusta pelletistä sekä palaturpeesta, lämpöarvoltaan lähimpänä kivihiiltä on torrefioitu pelletti. Sillä on myös muita hyviä ominaisuuksia kuten kosteudenkesto, minkä ansiosta pellettejä voidaan varastoida hetkellisesti myös ulkotiloissa. Tavallisessa puupelletissä lämpöarvo on matalampi ja varastoinnissa ja kuljetuksessa tulee huolehtia siitä, ettei pellettimassa joudu kosketuksiin veden kanssa. Puupellettiä on kuitenkin Suomessa saatavilla varsin hyvin, toisin kuin torrefioitua pellettiä, jonka tuotanto suuremmissa määrissä on vasta alkutekijöissä. Torrefioitu pelletti voisi soveltua hyvin kivihiilen korvaajaksi, mutta käyttöä rajoittaa vielä huono saatavuus. Ratkaisuna saatavuusongelmaan voisi pohtia biomassan torrefiointia ja pelletointia suoraan tehdasalueella käyttämällä hyödyksi esimerkiksi alueen mekaanisen met-säteollisuuden laitoksilta saatavia sivuvirtoja. Kyseisen ratkaisun kannattavuus voi tosin olla kyseenalainen, mutta voisi olla tarkastelun arvoista.

Palaturpeen lämpöarvo on matalampi kuin muiden työssä tarkasteltujen polttoaineiden, johtuen pääasiassa polttoaineen suhteellisen korkeasta kosteudesta. Mikäli turpeen annetaan kuivua laitoksen alueella, saataisiin tehollista lämpöarvoa nostettua, mutta kuivaaminen vaatisi sille tarkoitetun sateelta suojatun tilan, eikä olisi kovinkaan tehokasta. Johtuen palaturpeen verrattaen huokoisesta rakenteesta, sen energiatiheys on muihin käsiteltyihin polttoaineisiin verrattuna varsin huono, tämä yhdessä matalan lämpöarvon kanssa saa aikaan sen, että tilavuusvirta kattilaan on merkittävästi suurempi kuin muilla mainituilla polttoaineilla. Näin ollen tulee myös selvittää, kuinka kattila käyttäytyy tilanteessa, jossa polttoainevirta on suuri ja polttoaineen kosteus korkea. Lisäksi tulee ottaa huomioon myös sulkusyöttimille johtavan kolakuljettimen kapasiteetin aiheuttamat rajoitukset tilavuusvirrassa. Mikäli asiaa pohditaan ympäristönäkökulmasta ei kivihiilen korvaaminen turpeella kuitenkaan ole erityisen hyvä ratkaisu, johtuen turpeen erittäin hitaasta uusiutumisesta ja korkeista päästöistä.

Polttoaineen syöttölaitteistojen osalta nykyiset purkulaitteet voisivat periaatteessa soveltaa pellettien syöttämiseen. Niiden kapasiteetti voisi mahdollisesti riittää tukipolttoainekäytössä kuoren rinnalla. Kuitenkin mikäli halutaan tuottaa koko kattilan lämpöteho uudella polttoaineella, on kuljettimet ja siilojen purkulaitteet uusittava tai niiden kapasiteettia kasvatettava. Siilojen purkamiseen on tarjolla kaikille käsitellyille polttoaineille soveltuva ruuvipurkujärjestelmä, jollaisen asentaminen vaatisi siilon pohjarakenteen vaihtamisen.

Polttoaineen siirtämiseen purkaimelta sulkusyöttimiä syöttävälle kolakuljettimelle tulisi todennäköisesti tapahtumaan normaalia hihnakuljetinta käyttäen. Kaikkia käsiteltyjä polttoaineita yhdistää niiden taipumus tuottaa pölyä käsiteltäessä ja siirrettäessä. Tämä on otettava huomioon siilojen ja kuljetinten muutostöitä suunnitellessa. Polttoaineensyöttöjärjestelmän ATEX-määritykset tulee vaadituilta osin arvioida uudelleen korvaavien polttoaineiden ominaisuuksien perusteella. Siiloille ja syöttölaitteiden turvajärjestelmille tulee määritysten perusteella suorittaa tarvittavat muutokset.

Näkisin puupelletin tässä tapauksessa parhaana lähtökohtana pohdittaessa kivihiilen korvaamista. Pelletin saatavuus on varsin hyvä ja laitokselle asennettuja hiilen syöttölaitteita voidaan oletettavasti käyttää myös pelletille. Näin ollen voisi olla mahdollista pienellä määrällä testaamalla selvittää, onko pelletin käyttö nykyisillä laitteilla todella mahdollista. Mikäli näin on voitaisiin myös testata millaisia lämpötehoja pelletillä voidaan saavuttaa asennettujen laitteiden avulla. Suhteellisen varmana ratkaisuna tulevaisuutta varten voisi olla siilojen purkulaitteiden vaihto ruuvimallisiin sekä hihnakuljetinten asennus. Kyseinen yhdistelmä soveltuu laajalle kirjolle biomassapohjaisia polttoaineita, joten muidenkin kuin tässä työssä käsiteltyjen polttoaineiden hyödyntäminen olisi mahdollista, mikäli tarvetta ilmenee. Tulevaisuudessa mikäli torrefioidun pelletin saatavuus paranee, se on paras tutkituista polttoaineista kivihiilen tilalle. Mikäli silloin käytössä oleva polttoaine on esimerkiksi puupelletti, on sen vaihtaminen torrefioituun versioon suhteellisen helppoa.

LÄHDELUETTELO

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J., Korhonen J., 2016, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258.

Alakangas E., Hölttä P., Juntunen M., Vesisenaho T. 2011, Energiaturpeen tuotantotekniikka, Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 120.

Bergman P. 2005, Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process, ECN Biomass report, ECN-C-05-073.

Geologian tutkimuskeskus GTK 2010, Turve raaka-aineena, Geologian tutkimuskeskus, Saatavissa: <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/turve/>, Viitattu 22.4.2019

Gilbert Products Inc 2019, kuva ruuvipurkaimesta, Saatavissa: <https://www.gilbert-tech.com/en/scierie/equipments-sawmilling/silo-reclaimers/>, Viitattu 7.6.2019.

Järvinen T., Agar D. 2014, Experimentally determined storage and handling properties of fuel pellets made from torrefied whole-tree pine chips, logging residues and beech stem wood, Technical Research Centre of Finland (VTT)

Kauppalehti 2019, Stora Enso aikoo lopettaa Kiteen sahan ja keskittää kuusisahatavaran tuotannon Varkauteen — Kiteeltä katoamassa 85 työpaikkaa, Saatavissa: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/stora-enso-keskittamassa-tuotantoa-varkauteen-kiteen-sahalla-t-8030e408-fc11-4da3-97bf-4cf5ba5169a7>, Viitattu 8.7.2019

Polttoaineluokitus 2019, Tilastokeskus. Saatavissa: https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2019_v2.xlsx, Viitattu 6.4.2019.

Rauhanen M. 2019, Andritz Oy, Puhelinkeskustelu 28.5.2019

Sivonen A. 2019, Valokuvat voimalaitoksen hiilensyöttöjärjestelmästä.

Stelte W. 2015, Best Practice Guideline – Storage and Handling of torrefied biomass, Danish Technological Institute

Stelte W. 2012 Guideline: Storage and Handling of Wood Pellets, Resultat Kontrakt (RK) Report, Danish Technological Institute.

Stora Enso 2019, Talvi on kylmä, pelletti lämmittää, Saatavissa: <https://www.storaensometsa.fi/pellettien-verkkokauppa/>, Viitattu 8.7.2019

Stora Enso 2018, Tietoja tehtaasta sekä energiantuotannosta, Yhtiön sisäinen materiaali.

Tilastokeskus 2017, Teollisuuden energiankäyttö 2017, Tilastokeskus, Saatavissa: https://www.stat.fi/til/tene/2017/tene_2017_2018-11-19_fi.pdf, Viitattu 22.4.2019

Timber Industry News 2018, New torrefied wood pellet plant in Estonia, Saatavissa: <https://www.timberindustrynews.com/new-torrefied-wood-pellet-plant-estonia/>, Viitattu: 12.6.2019

Valmet Oyj 2018, Valmet to deliver the world's first BioTrac™ Steam Explosion System for black pellet production in France, Saatavissa: <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2018/valmet-to-deliver-the-worlds-first-biotrac-tm-steam-explosion-system>, Viitattu: 7.6.2019.

Valtioneuvosto 2018, Ministeri Tiilikainen: Kivihiilen kielto 2029 – kannustepaketti nopeille luopujille, Valtioneuvoston tiedote, Saatavissa: https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/1410877/ministeri-tiilikainen-kivihiilen-kielto-2029-kannustepaketti, Viitattu 22.4.2019

Virtanen K., Hänninen P., Kallinen R.-L., Vartiainen S., Herranen T., Jokisaari R., 2003, Suomen turvevarat 2000, Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 156.

Yrjölä S. 2019, BMH Oy, Puhelinkeskustelu 8.5.2019